

陈志丹, 刘睿, 张世民, 等. 基于河流地貌对祁连山北缘西段地壳活动性的研究[J]. 华南地震, 2020, 40(1): 1-10. [CHEN Zhidan, LIU Rui, ZHANG Shimin, et al. The Research of Crustal Activity in the Western Segment of the Northern Margin of the Qilian Mountains Based on River Geomorphology[J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 1-10]

基于河流地貌对祁连山北缘西段地壳活动性的研究

陈志丹^{1,2}, 刘睿¹, 张世民¹, 李安¹, Koronovskii N.V.²

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. Lomonosov Moscow State University, Russia 119234)

摘要: 祁连山是青藏高原的东北边界, 它既吸收了青藏高原东北方向的地壳挤压缩短, 也协调了阿尔金断裂带的左旋走滑分量。祁连山北缘西段的河流地貌特征显示, 晚更新世以来北祁连山的隆升作用较为强烈。基于对活动断裂带附近阶地的高程测量和年代测定, 估算了北祁连山山前的玉门断裂 64 ka 以来的垂直滑移速率为 0.33 ± 0.02 mm/a, 水平缩短速率为 0.53 ± 0.03 mm/a。结合前人数据并对比发现, 祁连山北缘断裂带的活动区域正逐渐向北扩展, 且其主要活动范围已由原来的主边界断裂带转移到山前的新生断裂及其相关褶皱带中。在祁连山北缘西段, 祁连山北缘断裂带所承担的地壳缩短要大于祁连山内部的昌马断裂, 这也进一步反映了晚更新世以来北祁连山的地壳挤压活动强度要大于中祁连山。

关键词: 祁连山北缘; 河流阶地; 构造变形; 活动断裂

中图分类号: P315.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)01-0001-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.001

The Research of Crustal Activity in the Western Segment of the Northern Margin of the Qilian Mountains Based on River Geomorphology

CHEN Zhidan^{1,2}, LIU Rui¹, ZHANG Shimin¹, LI An¹, Koronovskii N.V.²

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia)

Abstract: The Qilian Mountains, as the northeastern margin of the Tibetan Plateau, not only absorbed the northeastern crustal shortening of the Tibetan Plateau, but also transformed the left-lateral strike-slip component of the Altun Tagh fault zone. The river geomorphology in the western segment of the northern margin of the Qilian Mountains shows that the uplift of the northern Qilian Mountains has been much strong since the late Pleistocene. Based on the height measurement and age constraint of the Baiyang River terraces in the western

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 中国地震活断层探测南北地震带北段项目(201408023); 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(ZDJ2014-12)以及国家留学基金共同资助

作者简介: 陈志丹(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为动力地质学、活动构造学。

E-mail: chenzhidan188@163.com.

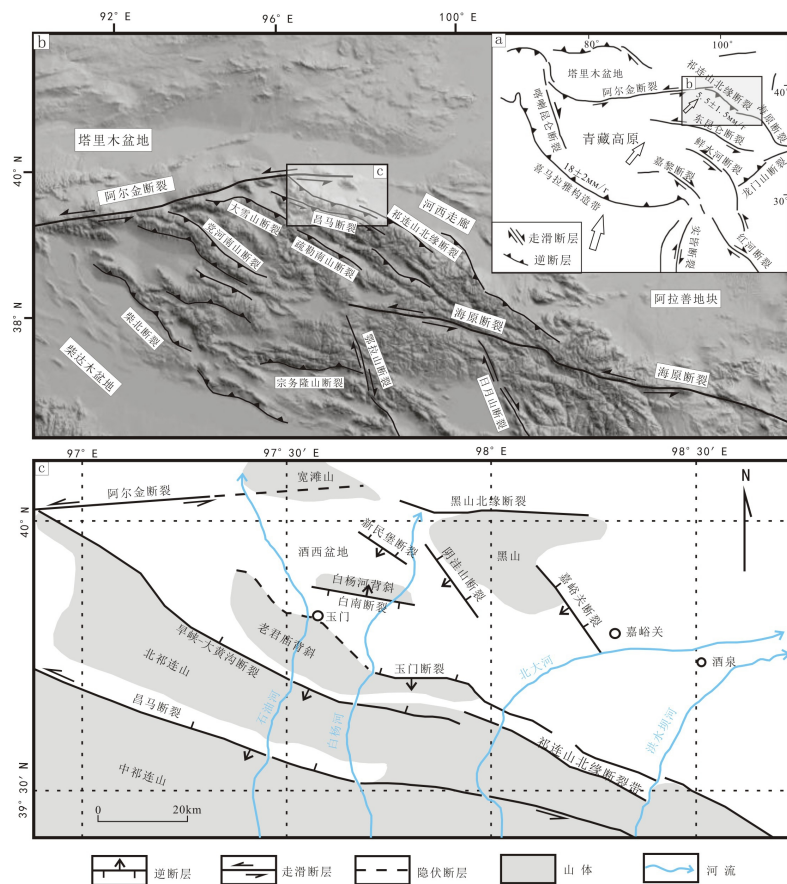
segment of the northern margin of the Qilian Mountains, the vertical slip rate of the Yumen fault is estimated to be 0.33 ± 0.02 mm/a and its horizontal shortening rate is 0.53 ± 0.03 mm/a. The active areas of the northern margin of the Qilian Mountains have been gradually expanding towards the north and its main active region has been transferred from the original main boundary fault to the newly generated fault and its relative fold belt in the piedmont. The result reflects that, in the western segment of the northern margin of the Qilian Mountains, the crustal shortening absorbed by the Qilian Mountains northern fault zone is much faster than that by the Changma fault, which further demonstrated that the compressive crustal activity of the northern Qilian Mountains is intenser than the middle Qilian Mountains since the late Pleistocene.

Keywords: The northern margin of Qilian Mountains; River terraces; Tectonic deformation; Active fault

0 引言

50 Ma 以来, 亚欧板块与印度板块的碰撞导致了青藏高原及其周缘山脉的强烈隆升。资料显示, 印度板块与欧亚大陆之间的缩短速率为 $40 \sim 50$ mm/a, 但是, 只有 18 ± 2 mm/a 被喜马拉雅俯冲带吸收, 其余的 $20 \sim 30$ mm/a 被青藏高原内部及其高原周缘山脉或深大断裂所吸收(图 1a), 主要通过逆冲断裂、褶皱变形、左旋走滑及其伴随的山脉隆升和盆地消亡来实现的, 这些构造变形综合反映了青

藏高原构造变形过程^[1-5]。祁连山作为青藏高原的东北边界, 其构造形变受到青藏高原挤压作用及周缘活动断裂的控制, 祁连山既吸收了青藏高原东北方向的挤压变形, 也协调了阿尔金断裂带与海原断裂带的左旋走滑分量^[6-7]。此外, 祁连山地区也是地震多发地带, 据记载, 青藏高原东北缘发生 7 级以上的地震达 19 次之多, 例如 1920 年海原地震, 1927 年古浪地震等。因此, 了解祁连山地区的地壳变形特点对该地区地震安全性评价也具有重要意义。



(a) 青藏高原构造简图; (b) 祁连山地区构造影像图, 位置见图 a 阴影框; (c) 祁连山北缘西段构造背景简图, 位置见图 b 阴影框

图 1 研究区构造背景简图

Fig.1 Structural background map of research area

祁连山北缘西段位于青藏高原块体、塔里木块体和阿拉善块体的衔接带上,地质背景特殊,构造过程复杂,变形方式多样(图1b)。20世纪后半叶以来,国内外地质学家通过磁性地层学、构造地貌学、热年代学等方法对祁连山北缘地区开展了多种多样的研究,并且对该地区的构造变形和地质演化有了初步了解^[1-2,4]。祁连山北缘断裂带是祁连山北缘一条东西走向的大型的活动断裂带,也是青藏高原的最东北边界。在青藏高原北向扩展的过程中,祁连山北缘发育了一系列的逆冲断裂和挤压褶皱,这些断裂和褶皱控制着该地区的地貌形态,也是潜在的发震区^[8]。了解这些断裂和褶皱的构造变形特点对于探讨北祁连山的地壳变形和该地区抗震建设具有重要意义。河流地貌学方法为研究祁连山北缘断裂带及褶皱带的晚第四纪构造变形提供了可能^[9-10]。河流地貌的形态与地表物质、构造运动、外营力作用和时间等因素有关。河流阶地作为废弃古河道,其形成以后主要受地壳变形的影响,在活动褶皱区,阶地纵剖面受后期构造作用会发生错断弯曲,阶地纵剖面的错断幅度和弯曲程度与断裂褶皱带的活动强度和持续时间有关,河流阶地地面的变形记录了活动构造带的变形过程。通过测量河流阶地地面的变形以及阶地年龄,可以得到活动构造带构造变形的量化信息,为讨论探讨研究区的新构造变形提供参考^[11-14]。

1 研究区构造背景

祁连山位于青藏高原东北缘,北纬 $36^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 和东经 $95^{\circ}\sim 104^{\circ}$ 之间。南北两侧分别被柴达木地块和阿拉善地块所围限,西端与高原北部阿尔金大型左旋走滑断裂相接,东端连接海原断裂(图1b)^[8]。祁连山作为青藏高原的东北边界,它既吸收了青藏高原东北方向的挤压缩短,也协调了阿尔金断裂带的左旋走滑分量^[6-7]。根据GPS资料,柴达木盆地和阿拉善之间的地壳缩短速率为 $5.5\pm 1.5\text{ mm/a}$,并计算得到青藏高原北部边界的阿尔金山、祁连山总共吸收了青藏高原 $15\%\sim 17\%$ 地壳缩短(图1a)^[15]。GPS数据显示,阿尔金断裂中段平均滑动速率约为 $10\pm 2\text{ mm/a}$,东段减少为 $1\sim 2\text{ mm/a}$ ^[5]。通过传统的地貌学方法结合测年技术,给出了阿尔金断裂带中西段第四纪以来滑动速率可达到 $17.5\pm 2.2\text{ mm/a}$,阿尔金断裂西段与祁连山北缘西段接壤地区的滑动速率衰减为 $4.8\pm 1\text{ mm/a}$,阿尔金断裂穿过祁连山北缘断裂以后,其左旋走滑速率仅为 2.2 ± 0.2

mm/a ^[16]。不管是传统的地貌学方法,还是GPS技术都显示祁连山地区承担了阿尔金断裂大量的左旋走滑分量。

祁连山北缘西段是塔里木块体、阿拉善块体和祁连山块体的接壤地区,其构造变形复杂。本文研究区便位于祁连山北缘西段,并以区内的一条南北向大型河流—白杨河,作为主要研究对象。区内由南向北发育3条NNW向活动断裂,分别为昌马断裂,早峡—大黄沟断裂,玉门断裂(图1c)。昌马断裂为祁连山内部一条左旋逆走滑断裂,是北祁连山和中祁连山的分界线,晚第四纪以前昌马断裂以挤压逆冲为主,晚第四纪以来,该断裂的活动性质发生不同程度的变化,逐渐发展为左旋走滑为主^[17]。早峡—大黄沟断裂和玉门断裂是祁连山北缘断裂带西段的两条分支断裂。早峡—大黄沟断裂为祁连山和酒西盆地的主边界断裂,曾发生了多期构造变动,而晚更新世以来则处于相对稳定状态,断裂活动方式以挤压逆冲为主^[17]。玉门断裂是祁连山北缘断裂向酒西盆地内逆冲扩展的新生断裂。玉门断裂东段地表陡坎明显,主断裂直接出露地表,导致新生代基岩地层与晚更新世沉积物直接接触。玉门断裂西段主要以活动褶皱的形式吸纳高原的挤压缩短,断层并未直接出露地表,根据钻孔与物探资料证实了断裂的存在,且表现为逆掩推覆的特点^[17-21]。在玉门断裂北侧为一条玉门断裂相关的背斜褶皱带—老君庙背斜^[17-18,22]。本文通过对祁连山北缘西段白杨河阶地的实地勘察,和对阶地变形的差分GPS测量,获取了断裂带附近河流阶地的变形量,结合阶地的年代数据,估算了活动断裂带的滑动速率,并据此分析研究区的地壳活动特点。

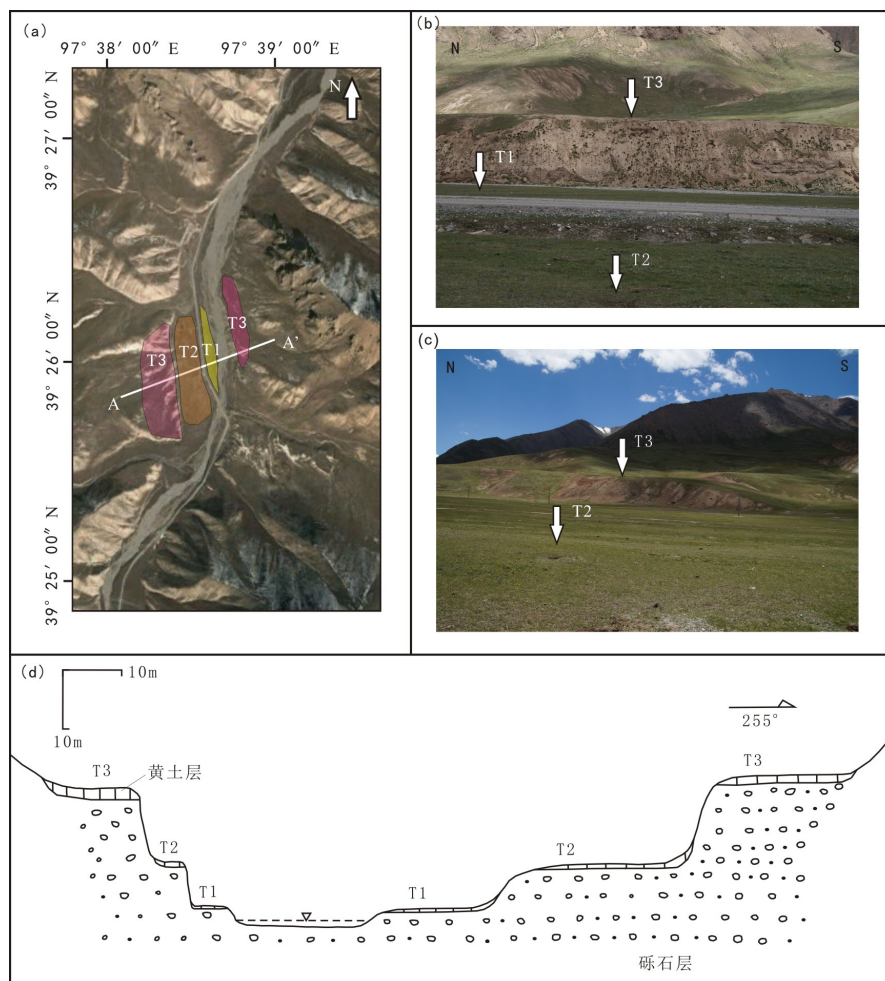
2 白杨河阶地发育特征

白杨河是祁连山北缘一条南北向河流,河流发育于祁连山内部,向北以大体垂直山脉走向的方向切穿祁连山北缘山区,出山后继续切穿山前褶皱带和冲洪积扇,并在冲积扇前缘区汇入酒西盆地,于盆地内干涸消亡。白杨河自南向北依次流经的活动断裂主要有:昌马断裂、早峡—大黄沟断裂、玉门断裂。在各条活动断裂的两盘地势起伏明显,断裂上盘为挤压隆起的高大山脉,断裂下盘为宽阔的盆地或平原(图1c)。本文根据流域内的断裂分布特点、地形特点以及河流地貌的发育特点把河流分为上、中、下游。将昌马断裂

以南的河段归为上游,昌马断裂至玉门断裂段归为中游,玉门断裂以北为下游。各河段的地貌特征如下:

上游阶地发育特点:白杨河上游河段流域面积较广,河谷宽阔,发育“U”型河谷。河床宽阔平坦,宽可达 50~150 m,河床遍布粗大砾石。河流下切不深,汇水面积较大,并有多条大型支流

汇入。在整个上游河段,普遍发育 2~3 级阶地, T1 和 T2 阶地广泛分布, T3 阶地局部发育。T1、T2、T3 都为堆积阶地, T1 阶地拔河 2~3 m, T2 阶地拔河 7~10 m, T3 阶地拔河 20~30 m。阶地的物质组成主要为河流相砾石层,砾石层上部盖有多种堆积物,如倒石堆、冲洪积砾石层、以及黄土等(图 2)。



(a)上游局部影像图;(b)东岸阶地地貌;(c)西岸阶地地貌;(d)阶地横剖面图,剖面位置见图 a 中 A-A'

图 2 白杨河上游阶地特征

Fig.2 Development characteristics of terraces in the upper reaches of Baiyang River

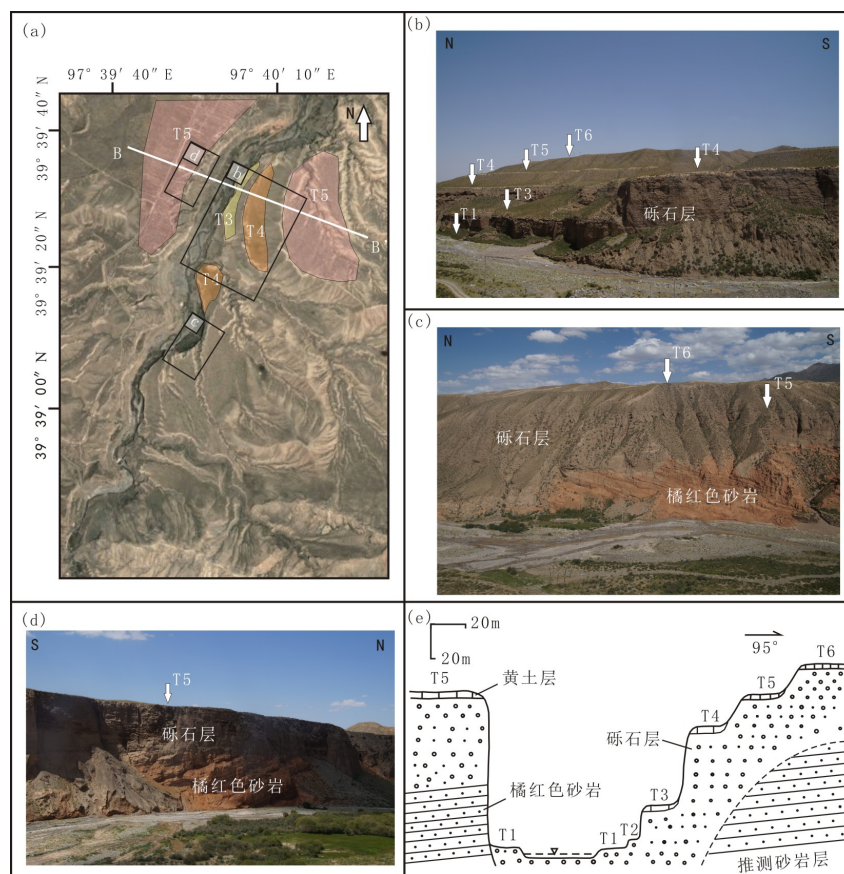
中游阶地发育特征:白杨河在切穿昌马断裂以后,流经一段狭长的东西走向的低洼谷地,谷地南北向宽达 4 km,该谷地也是中祁连山和北祁连山的地形分界线。河流穿过谷地以后,切穿北祁连山主山脉区。进入山脉区后,河谷明显变窄,原来数百米宽的河床迅速变为十几米,部分基岩河段甚至只有几米。与上游山区宽缓开阔的河谷相比,中游河段主要为深切的“V”字型河谷,阶地类型也由原来的堆积阶地,逐渐过度为侵蚀阶地和基座阶地。阶地级数逐渐增加,高阶地广泛

存在。在北祁连山南部发育 2~3 级阶地,中部增加为 4~5 级阶地,北部旱峡—大黄沟断裂附近,阶地级数可达 6~7 级。T1 阶地拔河为 2~3 m, T2 阶地 5~10 m, T3 阶地 20~30 m, T4 阶地 45~50 m, T5 阶地 65~75 m, T6 阶地 85~90 m,最高的 T7 的阶地拔河可达 110 m(图 3a、b、e)。其中 T3 阶地和 T5 阶地为该河段发育较好的阶地。阶地的物质组成与上游也发生了明显变化,侵蚀阶地和基座阶地的下部基岩主要为古生界的灰岩、中生代的灰岩和砂岩,以及新生界的红色砾岩、砂岩等

(图 3c、d)。在早峡—大黄沟断裂北侧 3km 内的河段,发育 6 级阶地,其中 T5、T6 阶地为该河段的流域性高阶地,广泛发育基座阶地,但基座出露并不齐整,在局部河段基座被砾石层覆盖,基座物质为中新统橘红色砂岩(图 3)。

下游阶地发育特征:白杨河穿过玉门断裂以后,继续切穿山前冲洪积扇区。在冲洪积扇区,河床变宽,河谷形态由中游的“V”型河谷又变为

“U”型河谷。低阶地在该河段不发育,仅发育两级高阶地,且都为堆积阶地。根据阶地的拔河高度,两级高阶地可对应中游的 T4 和 T5 阶地, T4 阶地拔河 45~50 m, T5 阶地拔河达 70~80 m (图 4)。阶地的物质组成主要为冲洪积相砾石层。河流在穿过冲洪积扇后,汇入酒西盆地,在盆地中部干涸消亡。



(a) 中游局部影像图; (b)(c) 东岸阶地地貌, 位置见图 a; (d) 西岸阶地地貌, 位置见图 a; (e) 阶地横剖面图, 剖面位置为图 a 中 B-B'

图 3 中游阶地发育特征

Fig.3 Development characteristics of terraces in the middle reaches of Baiyang River

通过分析白杨河各段河流地貌的发育特点, 不难发现, 白杨河中游河流地貌明显有别于上游和下游地区。主要表现为: 河谷和河床变窄, 河流下切更深, 河谷呈“V”字型, 阶地级数增加, 高阶地广泛发育, 阶地类型也发生变化, 以侵蚀阶地和基座阶地为主。并且白杨河作为祁连山北缘地区一条区域性河流, 上游和中游的山区气候及近地表的物质组成区别不会太大, 而如此明显的河流地貌差异, 可能在一定程度上受到了构造运动的影响。综合这些地貌特征, 初步判断, 白杨河中游地区特别的河流地貌可能与北祁连山较

为强烈的隆升作用有关。

3 活动断裂带的阶地变形

为了印证北祁连山更为强烈的挤压隆升作用, 本文收集了研究区内几条主要活动断裂带的活动数据, 并根据白杨河阶地的阶地面变形和阶地年龄, 估算了断裂带晚更新世以来的滑动速率。白杨河由南向北依次切穿 3 条大型的活动断裂, 分别为昌马断裂、早峡—大黄沟断裂、玉门断裂。本文采用了 Trimble R10GNSS 测量系统, 获取了断

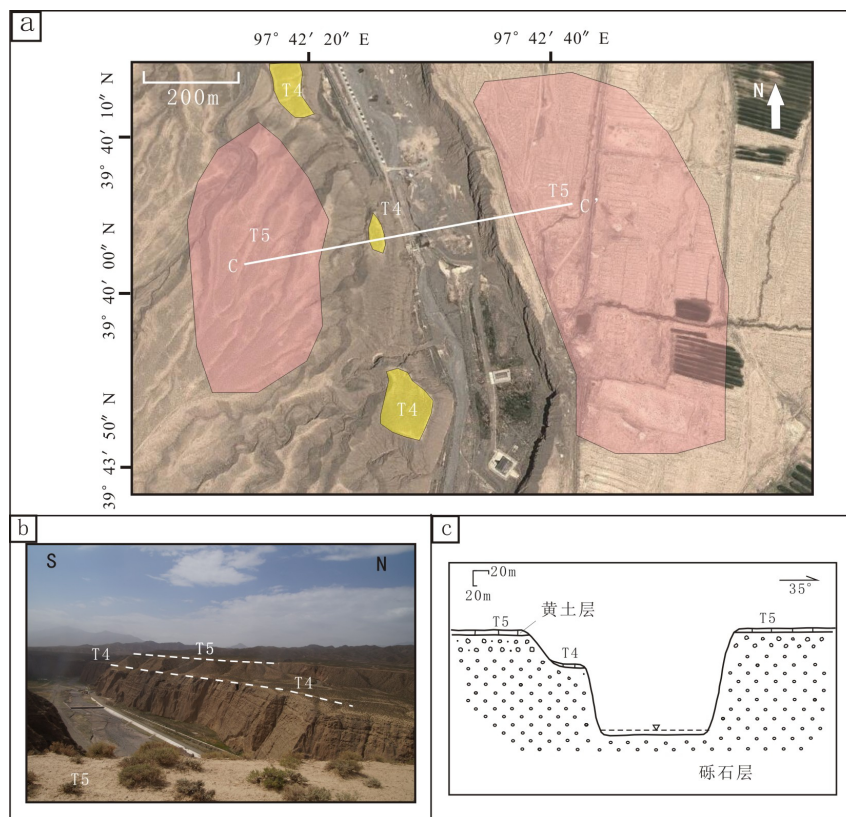
裂带附近阶地变形数据, 阶地年龄数据参考了玉门断裂北侧获取的阶地宇宙成因核素(^{10}Be)暴露年龄^[21]。

3.1 昌马断裂阶地变形

昌马断裂为中祁连山和北祁连山的分界线, 是祁连山内部一条活动强烈的左旋走滑兼逆冲断裂, 西端与阿尔金断裂相连, 东端与海原断裂相连, 全长约 120 km。断裂的总体走向为 NWW 向, 倾向 SE, 倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。昌马断裂在晚第四纪以前以挤压逆冲为主, 自晚更新世以来断裂活动性质发生了变化, 表现为以左旋走滑为主^[17]。在白杨河地区, 昌马断裂东段切穿了白杨河 T3 阶地(图 5c、d), 在白杨河东岸昌马断裂的断层剖面上, 可见前寒武系的灰色片麻岩逆冲到中新统白杨河

组橘红色砂岩之上, 断面有明显的挤压逆冲特征, 断裂产状 $165^{\circ}\angle 70^{\circ}$ (图 5d)。

本文课题组对白杨河地区昌马断裂的阶地变形进行了精细测量, 并得到了昌马断裂 59 ka 以来的垂直滑移速率为 $0.31\pm 0.06\text{ mm/a}$, 水平缩短速率为 $0.11\pm 0.02\text{ mm/a}$ ^[21]。从昌马断裂的错断山脊和冲沟的表现来看, 昌马断裂呈现出明显的左旋走滑特征(图 5b)。根据昌马断裂的典型错断地貌, 得到昌马断裂西段的左旋走滑速率为 $1.33\pm 0.39\text{ mm/a}$, 中段的左旋走滑速率为 $3.11\pm 0.31\text{ mm/a}$, 东段的走滑速率为 $3.68\pm 0.41\text{ mm/a}$; 昌马断裂西段的平均逆冲速率为 $0.60\pm 0.16\text{ mm/a}$ ^[23]。并结合昌马断裂东段的逆冲速率 $0.31\pm 0.06\text{ mm/a}$, 不难发现, 昌马断裂的左旋走滑速率由西到东逐渐变快, 而逆冲速率由西到东逐渐变慢(图 5a)。



(a)下游局部影像图;(b)西岸阶地地貌;(c)阶地横剖面图,剖面位置为图 a 中 C-C'

图 4 下游阶地发育特征

Fig.4 Development characteristics of terraces in the lower reaches of Baiyang River

3.2 祁连山北缘断裂阶地变形

祁连山北缘断裂是祁连山与酒西盆地的分界线, 也是整个青藏高原的东北边界, 控制着研究区地貌形态。祁连山北缘断裂的东段和中段断层界限清楚, 地面陡坎明显, 没有明显的分支现象。而祁连山北缘断裂西段分解为两条近东西向的活

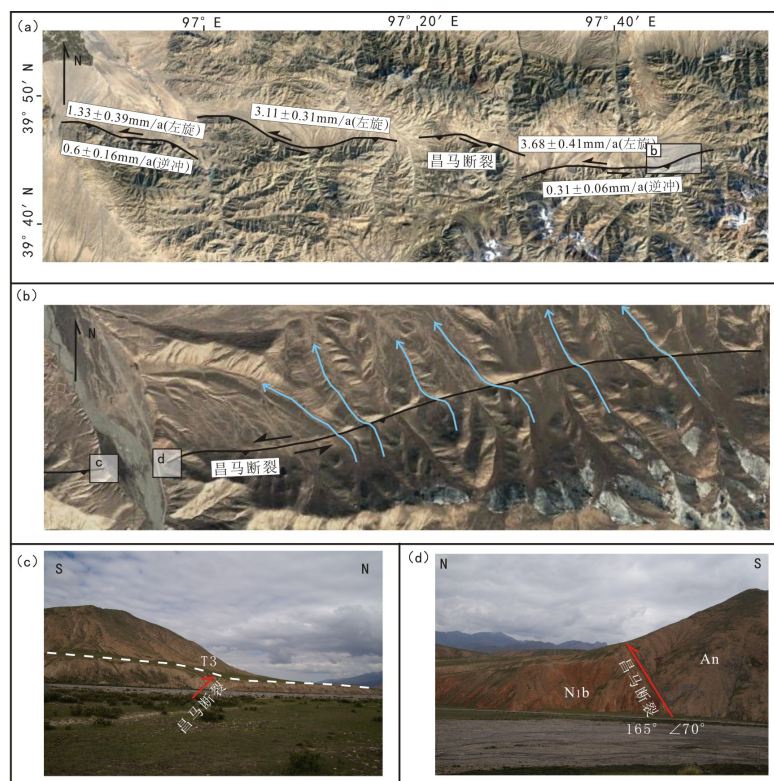
动断裂, 南支为旱峡—大黄沟断裂, 北支为玉门断裂。旱峡—大黄沟断裂是北祁连山与酒西盆地的主边界断裂, 曾发生了多期构造变动, 而晚更新世以来活动较弱, 断裂活动方式以挤压逆冲和逆掩推覆为主。玉门断裂是祁连山北缘断裂向酒西盆地内逆冲扩展的新生断裂, 并伴随与断裂作

用相关的逆冲推覆褶皱^[17]。在白杨河地区,早峡—大黄沟断裂和玉门断裂未见明显水平错断现象。

3.2.1 早峡—大黄沟断裂阶地变形

早峡—大黄沟断裂在白杨河地区有明显的断层界限,可见奥陶系灰岩逆冲到下更新统玉门砾岩之上,断裂面陡立,断裂面产状为 $178^{\circ}\angle 75^{\circ}$ ^[21]。河流在早峡—大黄沟断裂附近发育5级阶地,T1和T2阶地仅在上盘发育,T3、T4、T5阶地在断裂两

侧均有保留,但是阶地面的垂直变形并不明显。通过同级阶地的高程对比,在早峡—大黄沟断裂附近并未发现明显的阶地变形现象,说明白杨河阶地形成以来,早峡—大黄沟断裂没有明显的垂直活动^[21]。同时,在白杨河西侧石油河中早峡—大黄沟断裂通过的位置,河流阶地也没有明显的错断现象,表明早峡—大黄沟断裂的强烈活动时期早于晚更新世,而晚更新世以来无明显的垂直活动^[24]。



(a)昌马断裂带影像图;(b)白杨河地区昌马断裂影像图;(c)白杨河东岸昌马断裂错断地貌;(d)白杨河西岸昌马断裂错断地貌

图5 昌马断裂构造变形展示图

Fig.5 Map of terraces deformation near the Changma fault

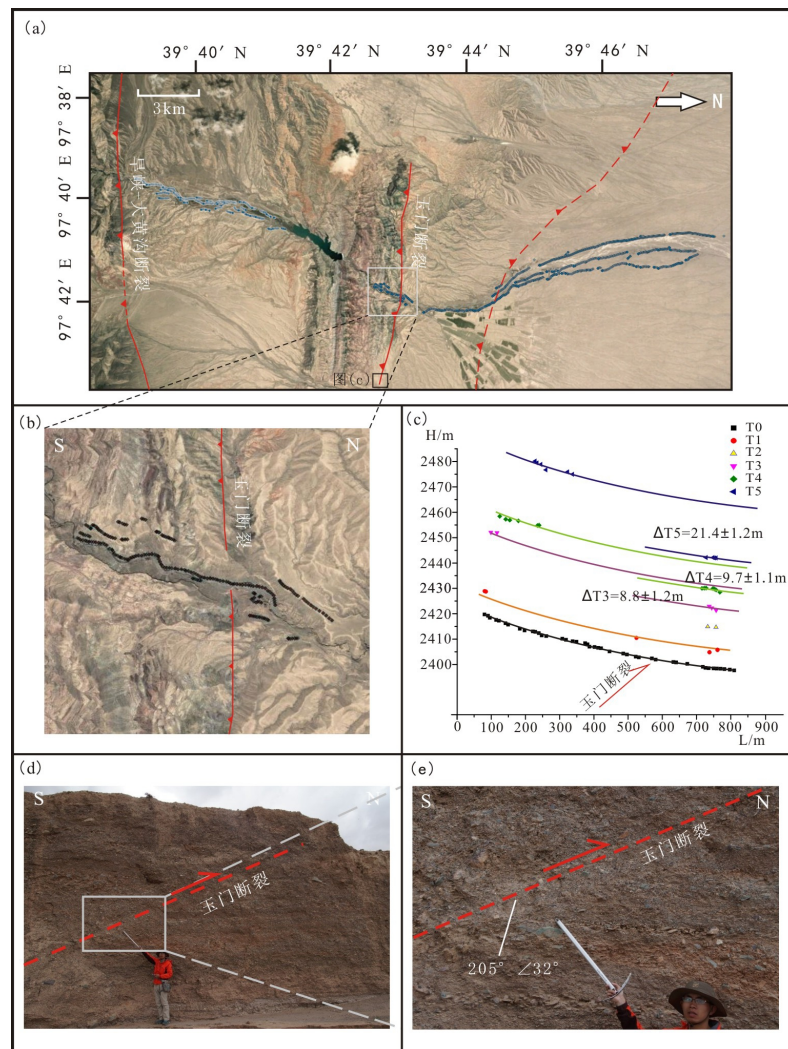
3.2.2 玉门断裂阶地变形

玉门断裂东西段的活动形式存在差异,在白杨河以东的地段,可见断裂出露地表,且地表陡坎明显,在白杨河东侧的冲沟中可见断裂冲断了第四纪冲洪积砾石层,断层面产状为 $205^{\circ}\angle 32^{\circ}$ (图6d、e);而玉门断裂西段主要表现为活动褶皱的形式,根据钻孔与物探资料证实了断裂隐伏于褶皱之下,表现为逆掩推覆的性质^[17-18]。玉门断裂北侧为一条新生代的背斜活动褶皱带—老君庙背斜,背斜的核部由晚第三系疏勒河组和白杨河组构成,两翼出露玉门砾岩、酒泉砾石层及戈壁砾石层^[17]。玉门断裂的活动导致了白杨河多级高阶地被错断,且各级阶地错断的幅度有差别。利用差分GPS测量了玉门断裂两盘近1 km范围内的阶

地发育情况,发现在断裂上下两盘存在明显的错位现象(图6a)。本文以河床纵剖面作为基准线,计算各级阶地的垂直错位。结果显示,阶地由低到高呈现明显增大的态势。T1、T2阶地未见明显错断现象;T3阶地的垂直错位为 8.8 ± 1.2 m;T4阶地的垂直错位为 9.7 ± 1.1 m;T5阶地的垂直错位为 21.4 ± 1.2 m(图6c)。根据白杨河东侧冲沟中断裂面产状为 $205^{\circ}\angle 32^{\circ}$ (图6e),结合利用三角函数关系,计算各级阶地的水平缩短量:T3阶地的水平缩短量为 14.1 ± 1.9 m;T4阶地的水平缩短量为 15.5 ± 1.8 m;T5阶地的水平缩短量为 34.2 ± 1.9 m。通过宇宙成因核素(^{10}Be)测年技术,得到早峡—大黄沟断裂附近T6阶地的年龄为 64.4 ± 9.0 ka^[21]。而T6阶地在早峡—大黄沟断裂附近为区域性的最高级阶地,可与

玉门断裂附近最高的区域性阶地 T5 阶地进行对比, 因此, 我们将 64.4 ± 9.0 ka 作为玉门断裂附近 T5 阶地的参考年龄。由此, 通过计算得到 64 ka 以来玉门断裂的垂直滑移速率为 0.33 ± 0.02 mm/a,

水平缩短速率为 0.53 ± 0.03 mm/a。这一结果略大于通过断层陡坎和探槽工作测得的玉门断裂晚更新世晚期以来的垂直活动速率 $0.24 \sim 0.30$ mm/a^[16]。



(a) 白杨河下游卫星影像图, 蓝点为阶地测量路径; (b) 玉门断裂带附近阶地测量路径图; (c) 阶地变形展示图;

(d)(e) 白杨河东侧冲洪积砾石层中玉门断裂断错剖面

图 6 玉门断裂带阶地变形展示图

Fig.6 Map of terraces deformation near the Yumen fault

4 讨论

祁连山作为青藏高原的东北边界, 其构造形变受到青藏高原挤压作用及周缘活动断裂的控制。祁连山既吸收了青藏高原东北方向的挤压变形, 也协调了阿尔金断裂带与海原断裂带的左旋走滑分量。山脉的隆升, 褶皱作用以及活动断裂的滑移作用, 是承担高原挤压缩短的重要形式^[6-7]。根据 GPS 资料指出, 祁连山正在遭受的挤压变形是均匀的, 挤压变形量在南祁连最大, 向北逐渐减小, 柴达木盆地和阿拉善之间的地壳缩短速率为

5.5 ± 1.5 mm/a, 青藏高原北部边界阿尔金山、祁连山总共吸收了青藏高原 15%~17% 地壳缩短^[15]。祁连山北缘是青藏高原东北向扩展的最前缘, 了解这一地区地壳的缩短速率和隆升过程, 对于探讨高原生长过程十分有益。本文通过分析河流地貌的发育特点, 发现晚更新世以来, 由祁连山北缘断裂带控制的北祁连山可能存在较为强烈的隆升过程 (图 7)。根据研究区内几条主要活动断裂带的滑移速率, 59 ka 以来昌马断裂的垂直滑移速率为 0.31 ± 0.06 mm/a, 水平缩短速率为 0.11 ± 0.02 mm/a^[21]; 64 ka 以来玉门断裂的垂直滑移速率为 0.33 ± 0.02 mm/a,

a; 水平缩短速率为 0.53 ± 0.03 mm/a。通过数据对比不难发现, 玉门断裂的水平缩短速率要大于昌马断裂的水平缩短速率, 垂直滑移速率大致相近。但应该注意到, 玉门断裂仅仅是祁连山北缘断裂带的一条分支断裂, 在白杨河地区, 祁连山北缘断裂带还包括早峡—大黄沟断裂以及与玉门断裂相伴生的逆冲推覆褶皱带—老君庙背斜。本文课题组通过测量老君庙背斜地区的地貌面变形, 得到 9ka 以来, 老君庙背斜的水平缩短速率为 $0.67 \pm$

0.44 mm/a, 垂直活动速率为 1.23 ± 0.81 mm/a^[21]。如果结合老君庙背斜以及早峡—大黄沟断裂的变形量, 祁连山北缘断裂带的水平缩短速率和垂直隆升速率都要明显大于祁连山内部的昌马断裂带(图 7)。此外, 早峡—大黄沟断裂晚更新世以来垂直活动不太明显, 而其北侧的玉门断裂活动却较为强烈, 可能是在祁连山北缘断裂带北向扩展的影响下, 断裂带的活动区域发生迁移, 导致早峡—大黄沟断裂大部分的挤压变形量转移到山前的玉门断裂及其相关褶皱带中。

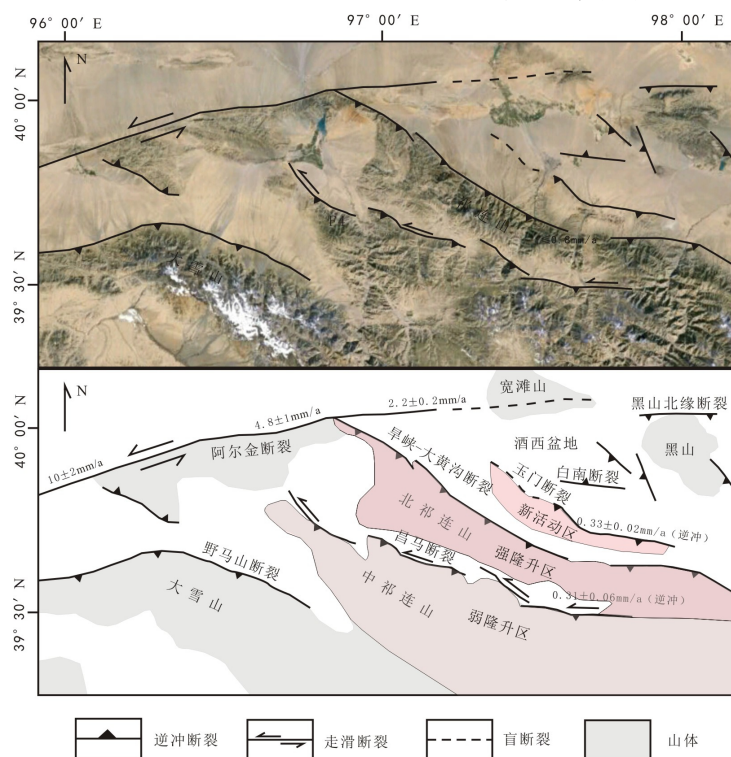


图 7 祁连山北缘西段地壳活动性展示图

Fig.7 Crustal activity in the western segment of the northern margin of the Qilian Mountains

前人研究已表明, 阿尔金断裂大量的左旋走滑位移转移到了祁连山造山带中^[26]。昌马断裂是中祁连山和北祁连山的重要分界线, 西端与阿尔金断裂相连, 贯穿祁连山内部。阿尔金断裂的部分左旋走滑分量转移到昌马断裂当中。从昌马断裂的错断山脊和冲沟的表现来看, 昌马断裂呈现明显的左旋走滑特征。昌马断裂西端的左旋走滑速率为 1.33 ± 0.39 mm/a, 中段的左旋走滑速率为 3.11 ± 0.31 mm/a, 东段的走滑速率为 3.68 ± 0.41 mm/a。西段的逆冲速率为 0.60 ± 0.16 mm/a, 东段的逆冲速率为 0.31 ± 0.06 mm/a(图 7)^[23]。数据显示, 昌马断裂的左旋走滑速率由西到东逐渐变快, 而逆冲速率却由西到东逐渐变慢。昌马断裂平均左旋走滑速率为 2.70 ± 0.37 mm/a, 平均逆冲速率为 0.46 ± 0.11 mm/a。徐锡伟等通过传统的构造地貌学

方面, 给出了阿尔金断裂西段与祁连山北缘西侧接壤的地区, 其左旋走滑速率为 4.8 ± 1 mm/a, 阿尔金断裂穿过北祁连山以后, 其左旋走滑速率仅为 2.2 ± 0.2 mm/a(图 7)^[23]。昌马断裂 2.70 ± 0.37 mm/a 的左旋走滑速率几乎恰好补足了 4.8 ± 1 mm/a 和 2.2 ± 0.2 mm/a 间的差值。也许在祁连山北缘西段地区, 昌马断裂的左旋走滑作用正是协调阿尔金断裂左旋走滑作用的主要方式。

5 结语

通过对祁连山北缘西段白杨河阶地的野外调查和精细测量, 就白杨河的阶地发育特征和祁连山北缘西段多个活动断裂带的新构造变形特征取得了以下几点认识:

白杨河阶地发育特征在各个河段具有差异性,且具构造指示意义。在昌马断裂以南的上游河段,为“U”型河谷,且河床平缓,河流下切不深,仅发育3级低阶地,主要为堆积阶地;在昌马断裂和玉门断裂之间的中游河段,为“V”型河谷,河床狭窄,河流下切很深,甚至切穿下部基岩,阶地级数增加,阶地拔河增高,最多发育7级阶地,最高的T7阶地可达110 m,主要为基座阶地;玉门断裂以北的下游河段,河床同样平缓,但河流下切很深,发育两级高阶地,主要为堆积阶地。根据河流地貌特征初步判断,白杨河中段流经的北祁连山地区晚更新世以来可能经历了较为强烈的隆升过程。

祁连山北缘断裂带西段其主要活动区域正逐渐向北扩展。祁连山北缘断裂带西段具有分支现象,南支的旱峡—大黄沟断裂带虽然为盆—山边界主断裂,但是晚更新世以来活动程度较弱,在旱峡—大黄沟断裂附近的河流阶地也未见明显的错断现象。反而北支的玉门断裂及其相关的逆冲推覆褶皱带活动强烈,河流阶地变形也较为明显,说明了晚更新世以来祁连山北缘断裂带活动区域逐渐向北扩展,且活动量大量转移到了山前的新生逆冲推覆带中。

基于白杨河阶地的变形数据和年代约束,对比了约60 ka以来,昌马断裂的垂直滑移速率为 0.31 ± 0.06 mm/a,水平缩短速率为 0.11 ± 0.02 mm/a;玉门断裂的垂直滑移速率为 0.33 ± 0.02 mm/a;水平缩短速率为 0.53 ± 0.03 mm/a。综合考虑祁连山北缘断裂带的变形情况,认识到祁连山北缘断裂带的地壳缩短速率和垂直隆升速率都要大于祁连山内部的昌马断裂,进一步印证了晚更新世以来北祁连山的挤压变形程度比中祁连山更为强烈。

参考文献:

- [1] Molnar P, Tapponnier P. The cenozoic tectonics of asia: effects of a continental collision [J]. Science, 1975, 189: 419–426.
- [2] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in china [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82: 2905–2930.
- [3] England P, Molnar, P. The field of crustal velocity in asia calculated from quaternary rates of slip on faults [J]. Geophys. J. Int., 1997, 130: 551–582.
- [4] An Yin, Mark Harrison T. Geologic Evolution of the himalayan tibetan orogeny [J]. Earth Planet, 2000, 28: 211–280.
- [5] 张培震, 沈正康, 王敏, 等. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学 [J]. 地震地质, 2004, 26(3): 367–376.
- [6] 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论 [J]. 地震地质, 2006, 26(1): 5–13.
- [7] 王伟涛, 张培震, 郑德文, 等. 青藏高原东北缘祁连山新生代构造变形 [C]. 北京: 中国地球科学联合学术会议, 2014.
- [8] 侯康明, 张忻, 刘小龙. 祁连山构造带的新构造变形机制 [J]. 华南地震, 1999, 19(2): 51–65.
- [9] 杨景春, 谭利华, 李有利, 等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化 [J]. 第四纪研究, 1998(3): 229–236.
- [10] 张世民, 任俊杰, 罗明辉, 等. 忻定盆地周缘山地的层状地貌与第四纪阶段性隆升 [J]. 地震地质, 2008, 30(1): 1–15.
- [11] 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜. 祁连山西段及河西盆地区第四纪构造运动的阶段划分 [J]. 第四纪研究, 1996, 16(3): 263–271.
- [12] 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜. 祁连山西段河西盆地区阶地构造变形的研究 [J]. 西北地震学报, 1998, 20(1): 28–36.
- [13] 杨景春, 李有利. 地貌学原理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [14] Shao L, Shimin Z, Rui D, et al. Upper crustal folding of the 2013 lushan earthquake area in southern longmen shan, China, insights from Late Quaternary fluvial terraces [J]. Tectonophysics, 2014, 639: 99–108.
- [15] 张培震, 王敏, 甘卫军, 等. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约 [J]. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 81–92.
- [16] 徐锡伟, Tapponnier P, Van Der Woerd, 等. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(10): 967–974.
- [17] 国家地震局地质研究所. 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [18] 宋廷光. 河西盆地老君庙逆冲断裂带及其演化 [J]. 石油与天然气地质, 1989, 10(1): 75–81.
- [19] 陈柏林, 刘建生, 张永双, 等. 玉门断裂全新世活动特征及其与玉门地震的关系 [J]. 地质论评, 2005, 51(2): 138–142.
- [20] 陈柏林, 王春宇, 宫玉良, 等. 河西走廊盆地西段玉门断裂晚新生代的的活动特征 [J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1709–1719.
- [21] 刘睿, 李安, 张世民, 等. 白杨河阶地揭示的北祁连山西段晚第四纪构造变形 [J]. 地震地质, 2017, 39(6): 1237–1255.
- [22] 方小敏, 赵志军, 李吉均, 等. 祁连山北缘老君庙背斜晚新生代磁性地层与高原北部隆升 [J]. 地球科学, 2004, 34(2): 97–106.
- [23] 罗浩, 何文贵, 王定伟, 等. 祁连山昌马断裂晚更新世滑移速率 [J]. 地震地质, 2013, 35(4): 765–777.
- [24] Hetzel R, Niedermann S, Tao M, et al. Climatic versus tectonic control on river incision at the margin of nE tibet: ^{10}Be exposure dating of river terraces at the mountain front of the qilian shan [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: F03012.
- [25] 李安, 王晓先, 张世民, 等. 祁连山北缘玉门断裂晚更新世以来的活动速率及古地震研究 [J]. 地震地质, 2016, 39(4): 897–910.